

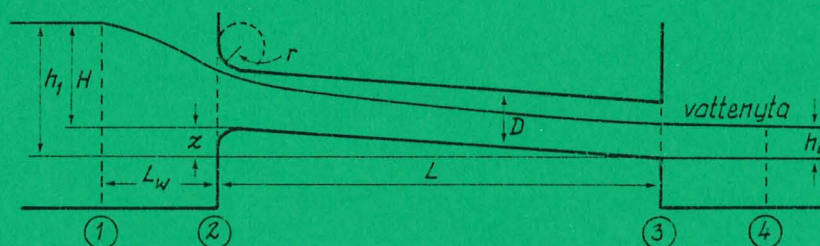


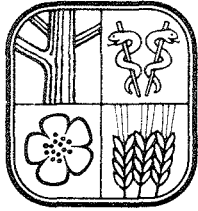
SVERIGES  
LANTBRUKSUNIVERSITET

## VATTENFÖRING GENOM CIRKULÄRA BROTRUMMOR

*Beräkningssätt under olika hydrauliska betingelser*

Anders Bjerketorp  
Lars Josefsson



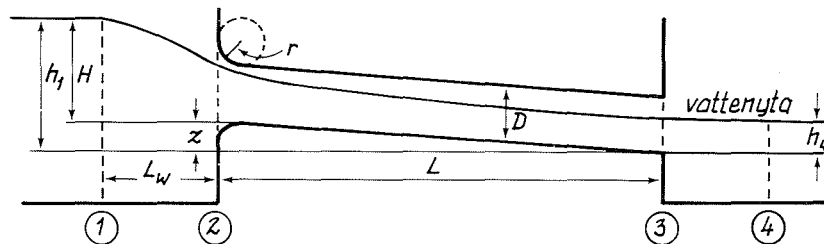


SVERIGES  
LANTBRUKSUNIVERSITET

## VATTENFÖRING GENOM CIRKULÄRA BROTRUMMOR

*Beräkningssätt under olika hydrauliska betingelser*

Anders Bjerketorp  
Lars Josefsson



## F Ö R O R D

Föreliggande avdelningsmeddelande, "Vattenföring genom cirkulära brotrummor. Beräkningssätt under olika hydrauliska betingelser", utgör en av undertecknad bearbetad version av en uppsats betitlad "Vattenföring genom kulvertar", som ventilerades vid ett seminarium i hydroteknikkurs 5, huvudavvattning, den 21 november 1984 (Miniseminarium 84:2). Seminarieuppsatsen, som tillkom i mycket nära samverkan med undertecknad i egen-skap av handledare, framlades av agr. stud. Lars Josefsson.

Uppsala i december 1985

Anders Bjerketorp

=====

I N N E H Å L L S F Ö R T E C K N I N G

=====

	Sidan
Inledning	1
Några grundbegrepp	1
Olika former av flöde	3
Typflöden	4
Beräkning (skattning) av vattenföringen	5
Vattenföringsberäkning för typflöde I	6
Vattenföringsberäkning för typflöde II	7
Vattenföringsberäkning för typflöde III	8
Vattenföringsberäkning för typflöde IV	9
Vattenföringsberäkning för typflöde V	13
Vattenföringsberäkning för typflöde VI	15
Litteraturförteckning	16

## Inledning

En i vårt land oftast förbisedd möjlighet att bestämma, eller åtminstone ganska väl uppskatta, större vattenföringar i små eller relativt små vattendrag är att utnyttja befintliga brotrummor för s.k. indirekt flödesmätning, en metod som inte fordrar någon vattenhastighetsmätning.

Den kanske viktigaste anledningen till att vattenföringsberäkning med hjälp av brotrummor inte kommit till större användning här i landet, torde vara metodens många hydrauliska komplikationer. Vattnets strömning in i, genom och ut från kulvertar kan, hydrauliskt sett, ske på flera olika sätt, allt efter rådande förutsättningar. För varje speciell flödessituation måste den hydrauliska strömningstypen (typflödet) identifieras och beräkning ske med det för den aktuella typen adekvata förfarings sättet.

Föreliggande uppsats ger helt kortfattat en översikt över (1) vilka hydrauliska typflöden man brukar definiera, (2) vad som kännetecknar dessa och (3) hur beräkningsgången är för vart och ett av typflödena.

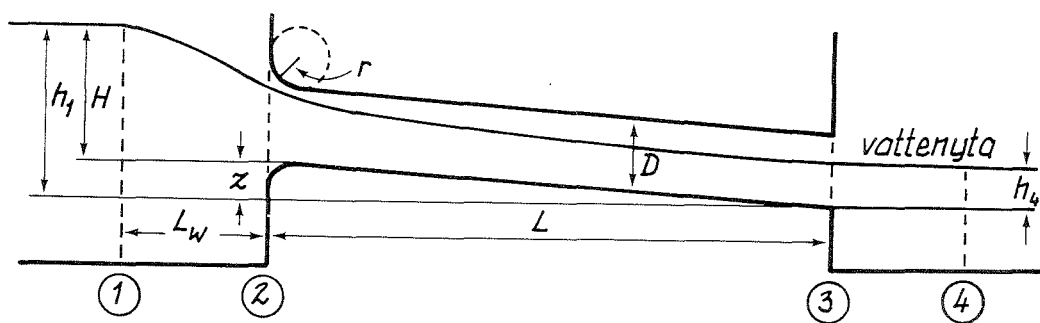
Som grund för framställningen ligger huvudsakligen de metoder och rutiner som utarbetats och prövats vid United States Geological Survey. Den mest centrala litteraturreferensen är BODHAINE (1968). En text som är näst intill identisk med BODHAINE (1968) återfinnes i WMO (1968). Viss kompletterande belysning av de vid kulvertströmning verksamma hydrauliska fenomenen kan inhämtas i HAGER (1984; 1985) och i BOYD (1985).

De möjligheter som i vissa fall föreligger att betrakta och behandla kulvertar som regelrätta överfallsvärn med s.k. långt krön, har inte tagits upp i föreliggande uppsats. I sammanhanget kan hänvisas till BJERKETORP (1976) och till i det arbetet anvisad litteratur. Såsom komplement till den litteraturen kan dock anföras JEGOROW (1935) och KOLUPAILA (1958).

Eftersom cirkulära trummor är de i särklass vanligaste kulvertarna i de vattendrag som är av störst omedelbart intresse för svenska lantbrukare och deras rådgivare, så har framställningen inskränkts till att gälla enbart sådana kulvertar. I t.ex. BODHAINE (1968) behandlas emellertid även trummor med annan geometrisk utformning av tvärsnittsarean.

## Några grundbegrepp

Den fortsatta diskussionen kommer i väsentlig mån att bygga på en genomgång av vilka olika typer av flöden som under skiftande förutsättningar kan uppträda i en trumma. Före denna genomgång måste emellertid några betydelsefulla grundbegrepp klarläggas. Detta sker i anknytning till figur 1 på omstående sida. De i figuren använda beteckningarna har följande betydelse:



Figur 1: Principskiss av en kulvert i genomskärning.

- L: kulvertens längd (m)
- D: kulvertens diameter (m)
- $h_1$ : differensen (i m) mellan vattenytan före begynnande avsänkning framför inloppet och kulvertbotten vid utloppet (=nollplanet)
- z: nivåskillnaden (i m) mellan kulvertens in- och utlopp
- $H=h_1-z$ : differensen (i m) mellan vattenytanivån före begynnande avsänkning framför inloppet och kulvertbotten vid inloppet
- $h_4$ : nedströmsvattenytans höjd (i m) över kulvertbotten vid utloppet (=nollplanet)
- r: krökningsradie för cirkulär avrundning av kulvertens inloppskanter
- ①: sektionen vid begynnande avsänkning framför inloppet
- ②: inloppssektionen
- ③: utloppssektionen
- ④: nedströmssektionen
- $L_w$ : horisontella avståndet mellan ① och ② (m)

Utöver dessa i figur 1 utsatta beteckningar förekommer i texten ytterligare några som lämpligen kan definieras i anslutning till de just genomgångna. Dessa ytterligare beteckningar är:

- $h_3$ : tryckhöjden i ③ över nollplanet (m)
- $d_2$  och  $d_3$ : vattendjup vid ② respektive ③ (m)
- $d_c$ : kritiskt djup (i m) för övergång mellan strömmande och stråkande vattenrörelse (jfr figurerna 5-7)
- $A_0$ : kulvertens totala tvärsnittsarea ( $A_0=\pi D^2/4$  m<sup>2</sup>)
- $A_3$ : aktuell våt area i ③ (m<sup>2</sup>)
- $A_c$ : area (i m<sup>2</sup>) av segmentet med kordans mittpunktsnormal lika med det kritiska djupet,  $d_c$



## Olika former av flöde

En kulvert kan gå full med vatten eller vara delvis vattenfylld. Fullgång kan förekomma såväl då (a) utloppet är täckt (submergerat), d.v.s. står under vatten ( $h_4 > D$ ; figur 2) som då (b) nedströmsvattenståndet är lägre än utloppets överkant ( $h_4 < D$ ; figur 3). Kulvertens lutning (fall) kan indelas i flack lutning och brant lutning (CHOW, 1959). Gränsvärdet mellan de två lutningskategorierna är ett kritiskt värde vid vilket, under vissa förutsättningar, växling sker mellan strömmande och strålkande vattenrörelse (jfr figurerna 5-7).

För att fullgång enligt alternativ (b) skall vara möjlig fordras dels att kvoten  $H/D = (h_1 - z)/D$  är större än ett visst kritiskt värde, dels att kulverten är vad man kallar hydrauliskt lång.

Det kritiska värdet för  $H/D$  betecknas i denna uppsats  $(H/D)_c$ .  $(H/D)_c$  är det värde på  $H/D$  vid vilket vattenytan vid inloppet tangerar kulvertens inre överkant. Då  $H/D > (H/D)_c$  uppträder endast flöden av typ I, II eller III (figurerna 2-4), då  $H/D < (H/D)_c$  förekommer endast flöden av typ IV, V eller VI (figurerna 5-7). Vanligen ligger  $(H/D)_c$  ungefär vid 1,5. Det förekommer dock att  $(H/D)_c$  kan vara något mindre än 1,5, beroende bl.a. på inloppets geometriska utformning. I de fall kulvertens utlopp är submergerat (figur 2) kan  $(H/D)_c$  sägas ha värdet 1.

Som framgår av figur 3 kan vattenflödet strax efter kulvertinloppet strypas till en stråle som inte helt uppfyller kulverten. Den sektion genom strålen där dennas area når sitt minimum kallas vena contracta. Strömningshastigheten har där accelererats upp till ett maximum. Efter vena contracta vidgas strålen och hastigheten retarderas, allteftersom vattnet förflyttas genom kulverten. Efter en viss sträcka är utfyllnaden fullständig, såvida kulvertens längd är större än den erforderliga utfyllnadssträckan. Om trumman inte hinner att fyllas helt innan vattnet nått utloppet, kallar man kulverten hydrauliskt kort. Hinner däremot kulverten fyllas helt före utloppet, kallas den hydrauliskt lång. Kulverten i figur 4 är hydrauliskt kort, medan kulverten i figur 3 är hydrauliskt lång.

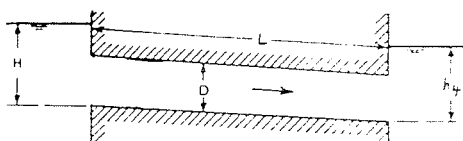
Flera faktorer, förutom den geometriska längden, inverkar på om en kulvert är hydrauliskt kort eller hydrauliskt lång. Några av dessa faktorer är kulvertens lutning, utformningen av inloppet, värdet av kvoten  $H/D$  samt förhållanden före inloppet och efter utloppet.

Under vissa speciella betingelser kan flödet i en kulvert skifta från fullgång till delfyllnad och tillbaka till fullgång igen (MORRIS & WIGGERT, 1972).

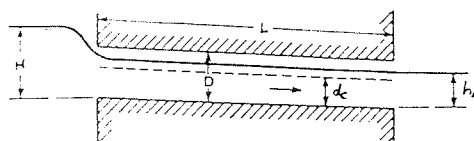
I en delvis fylld kulvert (figurerna 4-7) kan flödet vara enbart strömmande eller enbart stråkande eller vara sammansatt av båda dessa strömningsformer (MORRIS & WIGGERT, 1972). Vilket strömningsmönster som råder bestäms främst av kulvertens lutning och av vattenståndet vid utloppet, men även inloppsöppningens utformning kan inverka.

### Typflöden

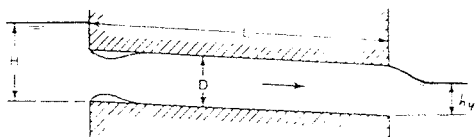
För praktiska ändamål kan flöden genom kulvertar klassificeras i sex olika typflöden, åskådliggjorda av figurerna 2-7. Indelningen följer CHOW (1959). Samma sex typer förekommer i andra arbeten, t.ex. i BOD-HAINE (1968), men numreringen är där annorlunda. Figurerna 2-7 är omarbetningar av figurer i CHOW (1959). Med anknytning till det tidigare förda resonemanget om fullgång och delfyllnad, kan en uppdelning av de sex typerna göras i två grupper, nämligen kulvertar med fullgång, representerade av typerna I och II, och kulvertar med delfyllnad, företrädda av typerna III, IV, V och VI. För de enskilda typerna gäller följande karakteristika:



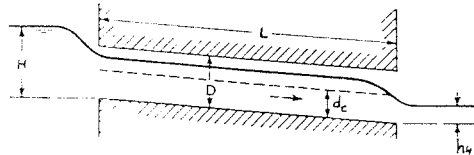
Figur 2: Typflöde I



Figur 5: Typflöde IV



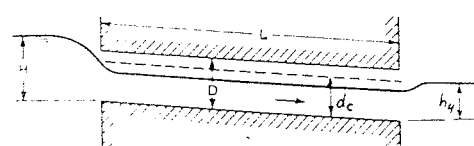
Figur 3: Typflöde II



Figur 6: Typflöde V



Figur 4: Typflöde III



Figur 7: Typflöde VI



- Typflöde I: Vattnet står över och täcker kulverten såväl vid inloppet som vid utloppet. Kvoten  $H/D$  är större än eller lika med ett. Flödet är helt oberoende av kulvertens lutning.
- Typflöde II: Vattnet täcker kulverten endast på inloppssidan. Kvoten  $H/D$  är större än  $(H/D)_c$ , d.v.s. vanligen större än 1,5. Kulverten är hydrauliskt lång.
- Typflöde III: Liksom ifråga om typflöde II täcker vattnet endast inloppssidan och kvoten  $H/D$  är större än  $(H/D)_c$ . Kulverten är emellertid i detta fall hydrauliskt kort. Den är alltså inte fullgående. Flödet är stråkande efter inloppet.
- Typflöde IV: Vattnet täcker varken inloppssidan eller utloppssidan. Kvoten  $H/D$  är mindre än  $(H/D)_c$ . Lutningen är flack. Flödet är strömmande genom hela kulverten, inklusive genom utloppet.
- Typflöde V: Inte heller här täcker vattnet vare sig inlopp eller utlopp. Kvoten  $H/D$  är mindre än  $(H/D)_c$  och lutningen är flack. Flödet är strömmande genom kulverten, men övergår till stråkande just i utloppet. Denna flödestyp överensstämmer bäst med villkoren för ett regelrätt s.k. långkrönat överfallsvärn,
- Typflöde VI: Liksom ifråga om typflödena IV och V täcker vattnet varken inlopp eller utlopp. Likaså är kvoten  $H/D < (H/D)_c$ . Lutningen är emellertid brant, varför flödet genom hela kulverten är stråkande.

#### Beräkning (skattning) av vattenföring

BODHAINE (1968) anför liksom WMO (1968) avbördningsekvationer med tillsvarende lösningsrutiner för vart och ett av de sex typflödena. Det bör emellertid påpekas att dessa ekvationer och lösningsmönster är baserade på teoretiska överväganden och laboratoriemässiga försök. Vissa parametrar kan i praktiken - åtminstone ibland - vara svåra att mäta. För sådana fall anvisar de anlitade källskrifterna dock alternativa tillvägagångssätt för beräkning och/eller skattning av vattenföringen. I det följande kommer de av BODHAINE (1968) och WMO (1968) föreslagna beräknings- och skattningsmetoderna att successivt genomgå typflöde för typflöde i ett kortfattat och tämligen summariskt sammandrag. I förekommande fall har transponeringar utförts från "fot-systemet" till SI-systemet.

## Vattenföringsberäkning för typflöde I

Avbördningen,  $Q_I$ , beräknas med hjälp av följande formel:

$$Q_I = C_I \cdot A_0 \sqrt{\frac{2g \cdot (h_1 - h_4)}{1 + \frac{124 \cdot C_I^2 \cdot L}{M^2 \cdot D^{4/3}}}} \quad (1)$$

där  $C_I$ : utströmningskoefficienten (-)

$g$ : accelerationen vid fritt fall ( $m/s^2$ )

$M$ : skrovlighetstalet i Gauckler-Hagen-Stricklers formel (GHS-formeln; "Mannings formel")

Innebörden av  $A_0$ ,  $h_1$ ,  $h_4$ ,  $L$  och  $D$  har tidigare klargjorts (s. 2).

Utströmningskoefficienten,  $C_I$ , är beroende av vilket värde kvoten  $r/D$  har (jfr s. 2). Värden på  $C_I$  ges i tabell 1, dels hämtade från BODHAINE (1968), dels framräknade med hjälp av följande av författarna framtagna utjämningsfunktion:

$$C_I = C_{II} = 1,19 \cdot (r/D + 0,03)^{0,1} \quad (2)$$

$$0,00 \leq r/D \leq 0,11$$

För  $r/D > 0,11$  föreslår författarna att  $c_I$  och  $c_{II}$  sättes till 0,98.

Tabell 1: Utströmningskoefficienterna  $C_I$  och  $C_{II}$  som funktioner av kvoten  $r/D$  enligt BODHAINE (1968) och enligt formel (2)

$r/D$	$C_I$ och $C_{II}$ enl. Bodhaine	$C_I$ och $C_{II}$ enl. formel (2)
0,00	0,84	0,838
0,01		0,862
0,02	0,88	0,882
0,03		0,898
0,04	0,91	0,912
0,05		0,924
0,06	0,94	0,935
0,07		0,945
0,08	0,96	0,954
0,09		0,963
0,10	0,97	0,970
0,11		0,978
0,12	0,98	(0,980)

## Vattenföringsberäkning för typflöde II

Avbördningen,  $Q_{II}$ , definieras av uttrycket:

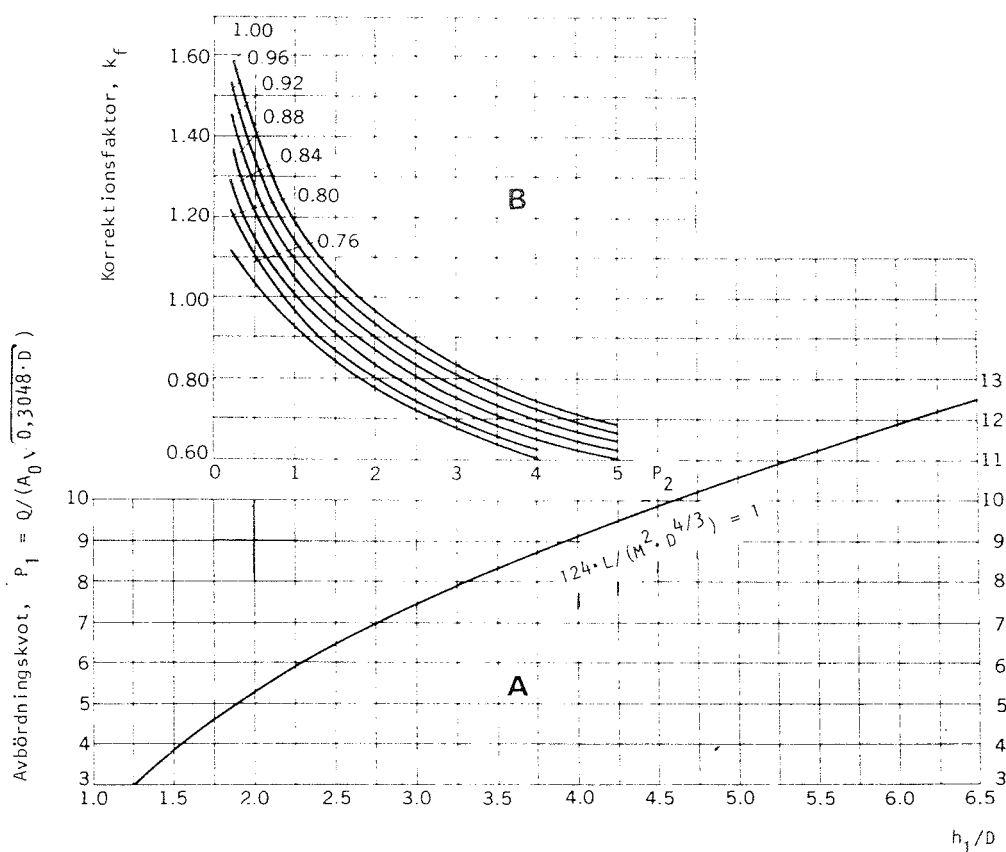
$$Q_{II} = C_{II} \cdot A_0 \sqrt{2g \cdot (h_1 - h_3 - h_{f_{2-3}})} \quad (3)$$

där  $C_{II}$ : utströmningskoefficienten (-)

$h_{f_{2-3}}$ : tryckhöjdsförlust i kulverten, d.v.s. på sträckan mellan sektionerna ② och ③ (s. 2)

Innebörden av  $A_0$ ,  $g$ ,  $h_1$  och  $h_3$  har tidigare angivits (s. 2 och 6). Utströmningskoefficienten,  $C_{II}$ , är numeriskt lika med  $C_I$  (se s. 6).

Bland de i ekvation (3) ingående parametrarna är särskilt en svår att bestämma, nämligen  $h_3$ , som kan variera bl.a. som funktion av Froudes tal. I stället för med (3) kan enligt BODHAINE (1968) och WMO (1968) avbördningen beräknas på följande sätt:



Figur 8: Diagram över (A) avbördningskvoten,  $P_1$ , som funktion av  $h_1/D$  och den kurva som definieras av likheten  $124 \cdot L / (M^2 \cdot D^{4/3}) = 1$  samt (B) över korrektionsfaktorn,  $k_f$ , som funktion av  $P_2$  (se texten) och avbördningskoefficienten,  $C_{II}$  (parametervärdeskurvor). Efter BODHAINE (1968), s. 34 (jfr WMO, 1968, s. 67).

- (a): Beräkna kvoten  $h_1/D$ .
- (b): Bestäm med hjälp av diagram A i figur 8 värdet av "avbördningskvoten"  $Q/(A_0\sqrt{0,3048\cdot D})$  som funktion av  $h_1/D$  och med stöd av kurvan för  $124\cdot L/(M^2\cdot D^{4/3}) = 1$ . Det funna värdet kallas  $P_1$ .
- (c): Beräkna värdet av  $124\cdot L/(M^2\cdot D^{4/3})$  för den aktuella kulverten. Det funna värdet kan betecknas med  $P_2$ .
- (d): Bestäm med hjälp av diagram B i figur 8 värdet av en korrektionsfaktor,  $k_f$ , som funktion av  $P_2$  och  $C_{11}$  ( $=C_1$ ).
- (e): Multiplicera det under (b) erhållna värdet  $P_1$  med korrektionsfaktorn,  $k_f$ , bestämd under (d). Härigenom erhålles ett justerat värde på det tidigare erhållna värdet av  $P_1$ .
- (f): Beräkna avbördningen,  $Q_{11}$ , med hjälp av följande formel, framtagen av författarna:

$$Q_{11} = 0,4336 \cdot k_f \cdot P_1 \cdot D^{2,5} \quad (4)$$

där  $D$ : den aktuella kulvertens diameter (m)

0,4336 är ett närmevärde av  $\pi\sqrt{0,3048}/4$

### Vattenföringsberäkning för typflöde III

Avbördningen,  $Q_{111}$ , kan beräknas med formeln:

$$Q_{111} = C_{111} \cdot A_0 \sqrt{2g \cdot (h_1 - z)} \quad (5)$$

där  $C_{111}$ : utströmningskoefficienten (-)

$A_0$ ,  $g$ ,  $h_1$  och  $z$  har definierats tidigare i denna uppsats (s. 2 och 6).

Den för typflöde III gällande utströmningskoefficienten,  $C_{111}$ , är beroende av  $H = (h_1 - z)/D$  liksom av  $r/D$ .  $C_{111}$ -värden kan erhållas från tabell 2, vilken är en avkortad version av en utförligare tabell på s. 44 i BODHAINE (1968). Jfr WMO (1968), s. 77.

Tabell 2: Utströmningskoefficienten,  $C_{III}$ , som funktion av  $(h_1 - z)/D$  och  $r/D$ . Efter BODHAINE (1968).

$(h_1 - z)/D$	$r/D=0,00$	$r/D=0,02$	$r/D=0,04$	$r/D=0,14$
1,4	0,44	0,46	0,49	0,51
1,5	0,46	0,49	0,52	0,54
1,6	0,47	0,51	0,54	0,56
1,7	0,48	0,52	0,55	0,57
1,8	0,49	0,54	0,57	0,58
1,9	0,50	0,55	0,58	0,60
2,0	0,51	0,56	0,59	0,62
2,5	0,54	0,59	0,62	0,66
3,0	0,55	0,61	0,64	0,70
3,5	0,57	0,62	0,65	0,71
4,0	0,58	0,63	0,66	0,72
5,0	0,59	0,64	0,67	0,73

#### Vattenföringsberäkning för typflöde IV

Avbördningen,  $Q_{IV}$ , definieras av uttrycket:

$$Q_{IV} = C_{IV} \cdot A_3 \cdot \sqrt{2g \cdot (h_1 + v_1^2/(2g) - h_3 - h_{f_{1-2}} - h_{f_{2-3}})} \quad (6)$$

där  $C_{IV}$ : utströmningskoefficienten (-)

$v_1$ : strömningshastigheten i sektion ① (m/s)

$h_{f_{1-2}}$ : tryckhöjdsförlust mellan sektionerna ① och ②

$A_3$ ,  $g$ ,  $h_3$  och  $h_{f_{2-3}}$  har definierats tidigare (s. 2, 6 och 7).

Liksom ifråga om typflöde II förekommer här svårbestämda parametrar i utgångsekvationen. I stället för att använda denna, d.v.s. ekvation (6), kan man enligt BODHAINE (1968) och WMO (1968) beräkna avbördningen med följande passningsförfarande:

(a): Skatta en avbördning,  $Q^*$ , med hjälp av uttrycket:

$$Q^* = C^* \cdot A_3 \cdot \sqrt{2g \cdot (h_1 - h_4)} \quad (7)$$

där  $C^*$ : ett skattat värde på utströmningskoefficienten (-)

En god startgissning på  $C^*$  uppger BODHAINE (1968) och WMO (1968) vara 0,95.

För att den våta arean,  $A_3$ , i sektion ③ skall kunna beräknas måste vattendjupet,  $d_3$ , i denna sektion vara känt. Är så fallet kan  $A_3$  beräknas med hjälp av följande formel (BJERKETORP, 1980):

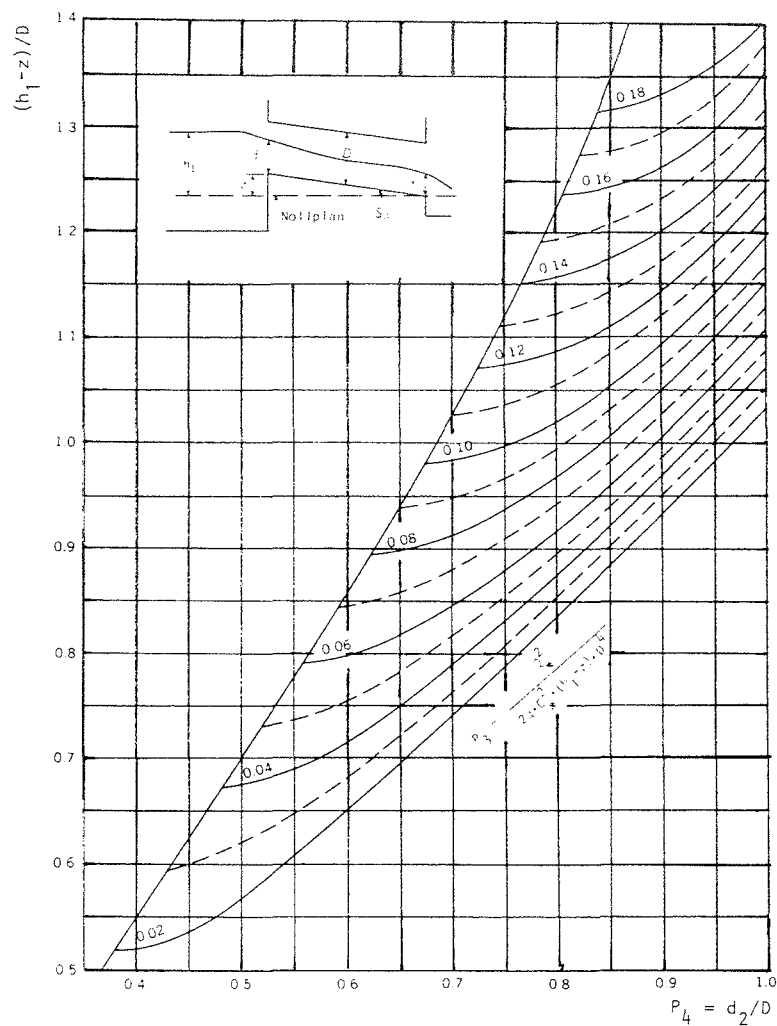
$$A_3 = 0,25 \cdot D^2 \arccos\left(1 - \frac{2 \cdot d_3}{D}\right) - (0,5 \cdot D - d_3) \sqrt{D \cdot d_3 - d_3^2} \quad (8)$$

(b): Beräkna följande dimensionslösa kvot:

$$P_3 = \frac{Q_*^2}{2g \cdot C_*^2 \cdot (h_1 - z) \cdot D^4} \quad (9)$$

(c): Bestäm med hjälp av diagrammet i figur 9 kvoten  $P_4 = d_2/D$  som funktion av  $(h_1 - z)/D$  och  $P_3$  (parametervärdeskurvor).  $d_2$  är vattendjupet mitt i sektion ②. Eftersom  $P_4$  bestäms med utnyttjande av estimeringsuttrycket (9), så är  $d_2$  ett skattat värde. Mätes  $d_2$  direkt, så kan (b), (c) och (d) överhoppas.

(d): Beräkna  $d_2$  ur sambandet  $d_2 = P_4 \cdot D$ .



Figur 9: Diagram över sambanden mellan  $P_4$ ,  $P_3$  och  $(h_1 - z)/D$  (se texten). Efter BODHAINE (1968), s. 27 (jfr WMO, 1968, s. 61).

- (e): Beräkna vattenföringskapaciteterna  $K_1$ ,  $K_2$  och  $K_3$  för sektionerna ①, ② resp. ③. Vattenföringskapaciteten,  $K_i$ , för en sektion ① kan definieras av följande uttryck (BJERKETORP, 1980):

$$K_i = M \cdot (R_{h,i})^{2/3} \cdot A_{v,i} = M \cdot (A_{v,i})^{5/3} \cdot (p_i)^{-2/3} \quad (10)$$

där  $R_{h,i}$ : hydrauliska djupet i sektion ① (m)  
 $A_{v,i}$ : våta arean i sektion ① (m<sup>2</sup>)  
 $p_i$ : vätta perimetern i sektion ① (m)

För cirkulära sektioner, såsom t.ex. sektionerna ② och ③, kan  $A_{v,i}$  beräknas med hjälp av ekvation (8). Vidare kan  $p_i$  beräknas med följande formel, enligt BJERKETORP (1980):

$$p_i = D \cdot \arccos\left(1 - \frac{2 \cdot d_i}{D}\right) \quad (m) \quad (11)$$

För cirkulära sektioner kan  $K_i$  beräknas genom att man begagnar sig av uttrycket (jfr BODHAINE, 1968):

$$K_i = C_{k,i} \cdot M \cdot D^{8/3} \quad (12)$$

där  $C_{k,i}$  är en vattenföringskonstant som finns tabulerad i tabell 3 (med 0,02  $d/D$  i steg). Utförligare tabeller (steg 0,01) finns på s. 14 i BODHAINE (1968) och på s. 49 i WMO (1968). Observera att konstanten inte är dimensionslös! Betydligt utförligare tabeller (steg 0,001 och 0,0001) återfinnes i BJERKETORP (1980).  $C_k$ -värdena i tabell 3 är hämtade från den sistnämnda referensen.

- (f): Beräkna tryckhöjdsförlusten,  $h_{f1-2}$ , förorsakad av friktionen längs sträckan mellan sektionerna ① och ② samt motsvarande friktionsförlust,  $h_{f2-3}$ , mellan sektionerna ② och ③ (se figur 1). Använd följande formler:

$$h_{f1-2} = L_w \cdot Q_*^2 / (K_1 \cdot K_2) \quad (m) \quad (13:1)$$

$$h_{f2-3} = L \cdot Q_*^2 / (K_2 \cdot K_3) \quad (m) \quad (13:2)$$

- (g): Beräkna hastighetshöjden,  $H_v$ , i sektion ①. Formel:

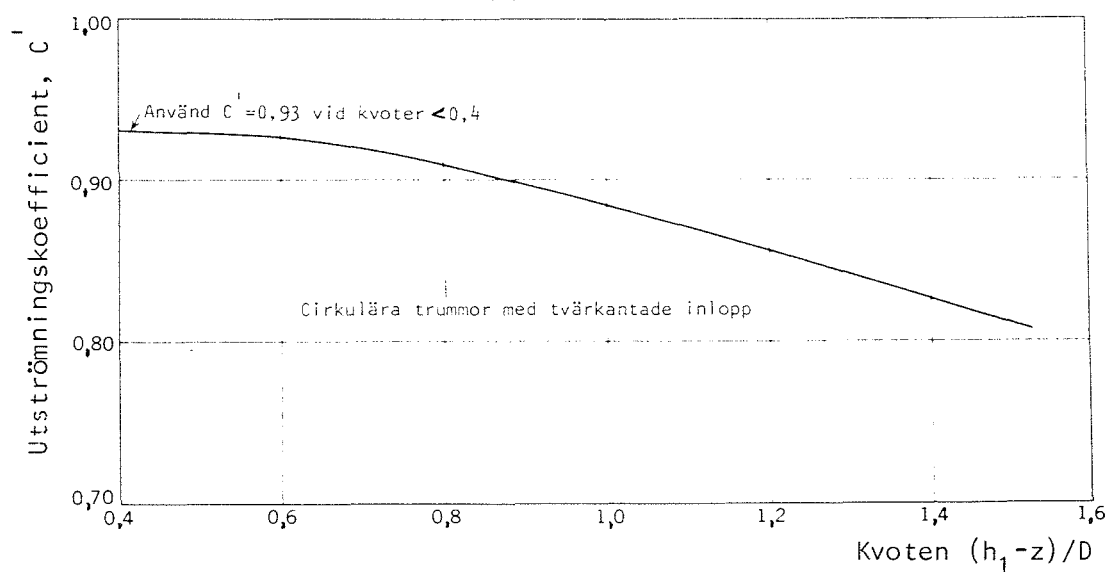
$$H_v = v_1^2 / (2g) = Q_*^2 / (2g \cdot A_1^2) \quad (m) \quad (14)$$

där  $v_1$ : strömningshastigheten i sektion ① (m/s)  
 $A_1$ : arean i sektion ① (m<sup>2</sup>)



Tabell 3: Värden på konstanten  $C_k$  för beräkning av vattenföringskapacitet och på konstanten  $C_q$  för beräkning av kritiskt flöde. Efter BJERKETORP (1980) resp. BODHAINE (1968).

d/D	$C_k$	$C_q$	d/D	$C_k$	$C_q$
0,02	0,000207	0,0014	0,52	0,1665	0,830
0,04	0,000929	0,0054	0,54	0,1772	0,892
0,06	0,002208	0,0121	0,56	0,1879	0,957
0,08	0,004065	0,0215	0,58	0,1987	1,023
0,10	0,006507	0,0334	0,60	0,2094	1,091
0,12	0,009533	0,0479	0,62	0,2200	1,163
0,14	0,01314	0,0649	0,64	0,2306	1,236
0,16	0,01731	0,0845	0,66	0,2409	1,312
0,18	0,02203	0,1064	0,68	0,2511	1,390
0,20	0,02730	0,1309	0,70	0,2610	1,472
0,22	0,03308	0,1577	0,72	0,2705	1,556
0,24	0,03937	0,1869	0,74	0,2798	1,644
0,26	0,04614	0,2185	0,76	0,2886	1,736
0,28	0,05337	0,2524	0,78	0,2969	1,833
0,30	0,06104	0,289	0,80	0,3047	1,935
0,32	0,06912	0,327	0,82	0,3118	2,044
0,34	0,07758	0,368	0,84	0,3183	2,161
0,36	0,08641	0,410	0,86	0,3239	2,290
0,38	0,09557	0,455	0,88	0,3286	2,432
0,40	0,1050	0,502	0,90	0,3322	2,59
0,42	0,1148	0,552	0,92	0,3345	2,79
0,44	0,1248	0,603	0,94	0,3353	3,05
0,46	0,1349	0,657	0,96	0,3339	3,41
0,48	0,1453	0,713	0,98	0,3294	4,09
0,50	0,1558	0,771	1,00	0,3117	----



Figur 10: Diagram visande grundvärdet,  $C'$ , av utströmningkoefficienterna  $C_{IV}$ ,  $C_V$  och  $C_{VI}$  som funktion av kvoten  $(h_1 - z)/D$ . Efter BODHAINE (1968), s. 39 (jfr WMO, 1968, s. 72).

(h): Avbördningen kan nu beräknas med formel (6). Det bör påpekas att  $h_3$  kan antagas vara lika med  $h_4$  när typflöde IV råder.

Utströmningskoefficienten,  $C_{IV}$ , i formel (6) är lika med  $k_r \cdot C'_{IV}$ . Diagrammet i figur 10 ger utströmningskoefficientens "grundvärde",  $C'_{IV}$ , som funktion av  $(h_1 - z)/D$ , medan  $k_r$ , som är en korrektionsfaktor för inverkan av avrundade inloppskanter, fås från diagrammet i figur 11 såsom funktion av  $r/D$ .

(i): Skulle den enligt (h) funna avbördningen,  $Q_{IV}$ , inte överensstämja med den i (a) antagna,  $Q_*$ , så återgår man till (a) för att skatta ett nytt  $Q_*$ -värde med hjälp av ekvation (7) och en ny "gissning" av  $C_*$ , varefter proceduren från (b) till (i) upprepas.

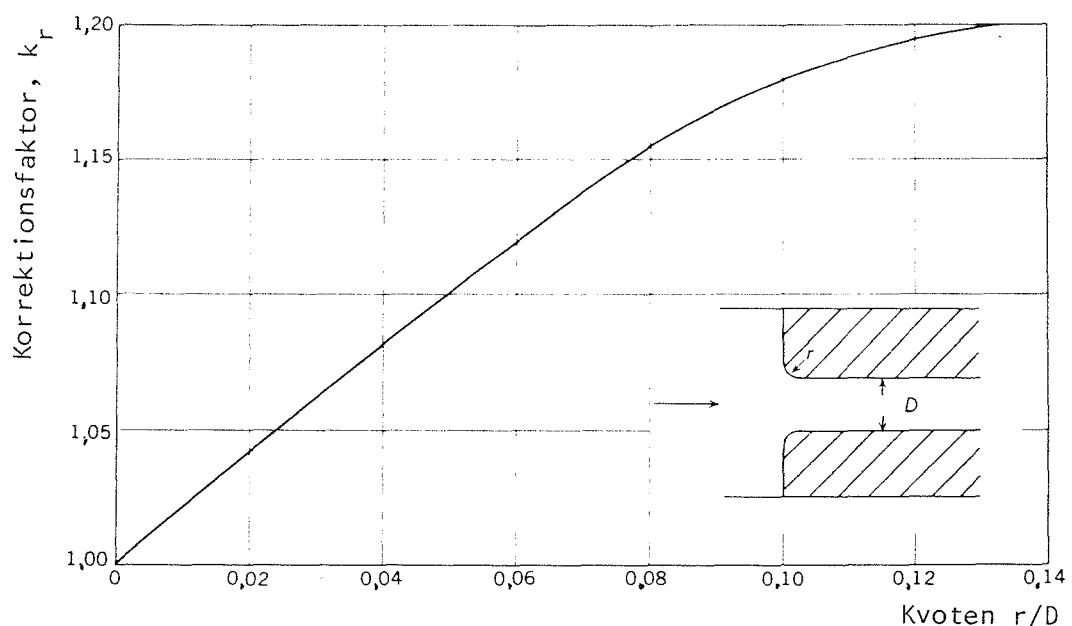
#### Vattenföringsberäkning för typflöde V

Avbördningen,  $Q_V$ , definieras av uttrycket:

$$Q_V = C_V \cdot A_c \cdot \sqrt{2g \cdot \left( h_1 + \frac{v_1^2}{2g} - d_c - h_{f_{1-2}} - h_{f_{2-3}} \right)} \quad (15)$$

där  $C_V$ : utströmningskoefficienten.  $C_V$  är numeriskt lika med  $C_{IV}$ .  
Se figurerna 10 och 11.

$A_c$ ,  $g$ ,  $h_1$ ,  $v_1$ ,  $d_c$ ,  $h_{f_{1-2}}$  och  $h_{f_{2-3}}$  har tidigare i denna uppsats definierats (s. 2, 6, 7 och 9).



Figur 11: Diagram visande korrektionsfaktorn,  $k_r$ , för grundvärdet av utströmningskoefficienterna  $C_{IV}$ ,  $C_V$  och  $C_{VI}$  som funktion av kvoten  $r/D$  (efter BODHAINE, 1968, s. 39).

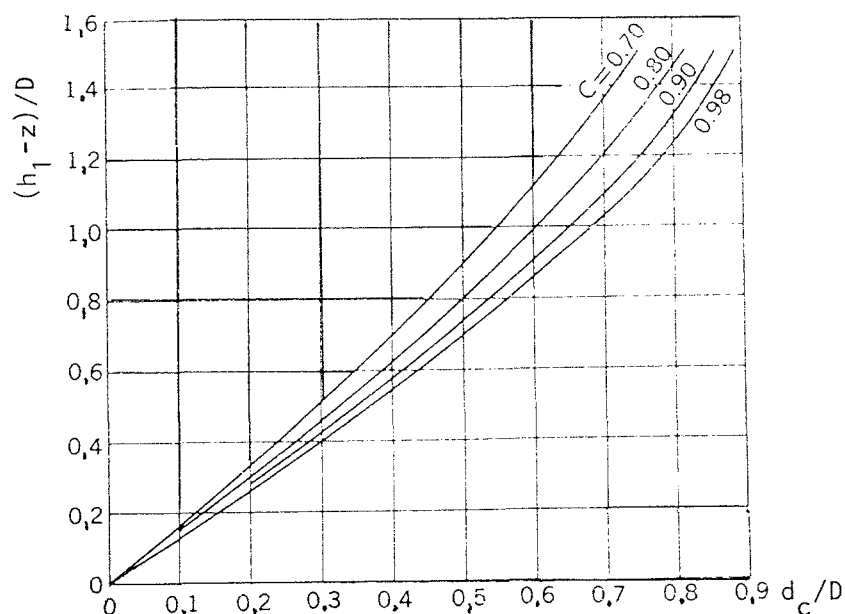
I ekvation (15) är särskilt  $d_c$  (och därmed  $A_c$ ), d.v.s. djupet vid kritisk flödeshastighet, svårt att fastställa. Det "kritiska djupet",  $d_c$ , ligger vid typflöde  $V$  i eller nära utloppssektionen (jfr s. 5). Enligt BODHAINE (1968) och WMO (1968) kan emellertid avbördningen skattas med en enklare ekvation, nämligen:

$$Q_V = C_q \cdot D^{2,5} \quad (16)$$

där  $C_q$ : en konstant eller rättare sagt en funktion som är beroende av  $d_c/D$ .

Beräkningsgången vid tillämpning av ekvation (16) är följande:

- (a): Beräkna kvoten  $(h_1 - z)/D$ .
- (b): Bestäm utströmningskoefficienten,  $C_V$ , med hjälp av diagrammen i figurerna 10 och 11.
- (c): Bestäm  $d_c/D$  med hjälp av diagrammet i figur 12, där den sökta kvoten erhålles som funktion av  $(h_1 - z)/D$  och  $C$  (märk att  $C = C_V$ ).  $C$ -värdena representeras av några parametervärdeskurvor.
- (d): Bestäm  $C_q = f(d_c/D)$  med hjälp av tabell 3 ( $d = d_c$ ).
- (e): Beräkna avbördningen,  $Q_V$ , med formel (16).



Figur 12: Diagram visande sambanden mellan kvoterna  $d_c/D$  och  $(h_1 - z)/D$  samt utströmningskoefficienten,  $C$  ( $C$  står för  $C_V$  eller  $C_{V1}$ ). Cirkulära trummor avses. Efter BODHAINE (1968), s. 25 (jfr WMO, 1968, s. 58).

### Vattenföringsberäkning för typflöde VI

Avbördningen,  $Q_{VI}$ , definieras av följande uttryck:

$$Q_{VI} = C_{VI} \cdot A_c \cdot \sqrt{2g \cdot (h_1 - z + \frac{v_1^2}{2g} - d_c - h_{f_{1-2}})} \quad (17)$$

där  $C_{VI}$ : utströmningskoefficienten för typflöde VI.

$C_{VI}$  är numeriskt lika med  $C_{IV}$ . Se figurerna 10 och 11.

$A_c$ ,  $g$ ,  $h_1$ ,  $z$ ,  $v_1$ ,  $d_c$  och  $h_{f_{1-2}}$  har tidigare i denna uppsats definierats<sup>1-2</sup> (s. 2, 6 och 9).

I ekvation (17) ingår liksom i ekvation (15) parametern  $d_c$ , d.v.s. djupet vid den kritiska gränshastigheten mellan de strömmande och stråkande flödesformerna. Vid typflöde VI återfinnes  $d_c$  inte vid utloppet som vid typflöde V, utan i eller nära inloppssektionen (jfr s. 5). Det "kritiska djupet" är emellertid inte därför lättare att fastställa.

Enligt BODHAINE (1968) och WMO (1968) kan man för approximation av avbördningen,  $Q_{VI}$ , vid typflöde VI tillämpa formel (16) på i princip samma sätt som redogjorts för i fråga om skattning av  $Q_V$ , d.v.s. med utnyttjande av diagrammet i figur 12 samt av  $C_q$ -värden i tabell 3.

För noggrannare bestämning av  $Q_{VI}$  (liksom förresten också av  $Q_V$ ) måste man tillämpa ett mer eller mindre omständligt passningsförfarande, vari skattning med formel (16) endast ingår som ett led. Det skulle föra för långt att här närmare redogöra för dessa passningsrutiner. Den intresserade läsaren hänvisas istället till den utförliga framställningen i BODHAINE (1968) och WMO (1968).

## Litteraturförteckning

- Bjerketorp, A. 1976. Vattenförling i en kulvert under överfallsvärn-  
tingelser. - Lantbrukshögskolan, Uppsala. Avd. för lantbru-  
kets hydroteknik. 15 s.
- Bjerketorp, A. 1980. Geometrisk analys av cirkulär trumma. - Sveriges  
Lantbruksuniversitet, Uppsala. Avd. för lantbrukets hydro-  
teknik. Opublicerat tabellmaterial. 282 s.
- Bodhaine, G.L. 1968. Measurement of peak discharge at culverts by indirect  
methods. - Techniques of water-resources investigations of the  
United States Geological Survey. Book 3:A3. Washington: United  
States Government Printing Office. 60 s.
- Boyd, M.J. 1985. Head-discharge relations for culverts. - International  
Association for Hydraulic Research. 21th Congress, Melbourne,  
August 19-23, 1985. Reprints. Seminar A, s. 118-122.
- Chow, V.T. 1959. Open-channel hydraulics, s. 493-499. New York: McGraw-  
Hill Book Co.
- Hager, W.H. 1984. Normalflusstiefe, kritische Tiefe und konjugierte Tie-  
fen in der Hydraulik offener Gerinne. - Schweizer Ingenieur  
und Architekt 102, s. 322-326.
- Hager, W.H. 1985. Abflussscheinungen in offenen Kanälen. - Schweizer  
Ingenieur und Architekt 103, s. 252-264.
- Hosang, W. & Bischof, W. 1969. Stadtentwässerung, 5:e uppl, s, 25-29.  
Stuttgart: B.G. Teubner.
- Jegorow, S.A. 1935. Überfall über breite Wehrkrone mit Kreisöffnung.  
Wasserkraft und Wasserwirtschaft 30:3, s. 31-34.
- Kolupaila, S. 1958. Discussion of "Flow through circular weirs" (by J.S.  
Stevens). - American Society of Civil Engineers, New York.  
Hydraulics Division, Journal 84:HY3, s. 1690:47-1690:53.
- Morris, H.M. & Wiggert, J.M. 1972. Applied hydraulics in engineering, 2:a  
uppl., s. 283-292. New York: The Ronald Press Co.
- WHO. 1968. Computation of flow through culverts. - World Meteorological  
Organization, Geneva. Technical Note 90: Measurement of peak  
discharge by indirect methods (WMO-No. 225.TP.119), s. 36-92.

Förteckning över utgivna häften i publikationsserien

SVERIGES LANTBRUKSUNIVERSITET, UPPSALA. INSTITUTIONEN FÖR MARKVETENSKAP.  
AVDELNINGEN FÖR LANTBRUKETS HYDROTEKNIK. AVDELNINGSMEDDELANDE.

- 81:1 Berglund, G., Eriksson, J., Berglund, K., Ingvarsson, A., Karlsson, I., Karlsson, S.-E.: Resultat av 1980 års fältförsök avseende täckdikning, övrig grundförbättring och bevattning. 13 + 47 + 38 s.
- 82:1 Berglund, G., Eriksson, J., Berglund, K. & Karlsson, S.-E.: Resultat av 1981 års fältförsök avseende täckdikning, övrig grundförbättring och bevattning. 80 s.
- 83:1 Berglund, G., Eriksson, J. & Karlsson, S.-E.: Resultat av 1982 års fältförsök avseende täckdikning, övrig grundförbättring och bevattning. 82 s.
- 83:2 Bjerketorp, A.: Höjning av nivåerna vid lågvattenföringar i Forsmarksåns vattensystem uppströms Lövestabruk. 4: Vattenståndet i den centrala sjökedjan. 41 s.
- 84:1 Berglund, G., Eriksson, J., Berglund, K., Karlsson, S.-E. & Gustafsson, E.-L.: Resultat av 1983 års fältförsök avseende täckdikning, övrig grundförbättring och bevattning. 103 s.
- 84:2 McAfee, M.: Assessing the effects of mole drainage on physical properties of a peat soil. Results from an experiment in mole drainage laid down in 1983. 23 s.
- 85:1 Linnér, H., Persson, R., Berglund, K., Karlsson, S.-E. & Gustafsson, E.-L.: Resultat av 1984 års fältförsök avseende täckdikning, övrig grundförbättring och bevattning. 89 s.
- 85:2 Jernlås, R.: Transport av bekämpningsmedel efter markapplicering. Litteraturstudie och experiment. 33 s.
- 85:3 McAfee, M.: Ytsänkning på torvjord. Bältinge Mossar 1904-1984. 31 s.
- 85:4 Heimer, A.: Värmlands Säby: Bestånds- och rotutveckling efter yt-täckning och strukturkalkning på en slammingsbenägen, torkkänslig mellanlera. 55 s.
- 85:5 Aronsson, Y.: Markförsämring genom saltanrikning. 87 s.
- 85:6 Bjerketorp, A. & Josefsson, L.: Vattenföring genom cirkulära brotrummor. Beräkningssätt under olika hydrauliska betingelser. 16 s.



Denna serie meddelanden utges av Avdelningen för lantbrukets hydroteknik, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala. Serien innehåller sådana forsknings- och försöksredogörelser samt andra uppsatser som bedöms vara av i första hand internt intresse. Uppsatser lämpade för en mer allmän spridning publiceras bl a i avdelningens rapportserie. Tidigare nummer i meddelandeserien kan i mån av tillgång levereras från avdelningen.

This series of Communications is produced by the Division of Agricultural Hydrotechnics, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala. The series consists of reports on research and field trials and of other articles considered to be of interest mainly within the department. Articles of more general interest are published in, for example, the department's Report series. Earlier issues in the Communications series can be obtained from the Division of Agricultural Hydrotechnics (subject to availability).

---

DISTRIBUTION:

ISSN 0282-6569

Sveriges Lantbruksuniversitet

ISBN 91-576-3291-X

Avdelningen för lantbrukets hydroteknik

S-750 07 UPPSALA, Sverige

Tfn 018/67 11 65, 018/67 11 81

---